

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開平8-288904

(43)公開日 平成8年(1996)11月1日

(51)Int.Cl.⁶

識別記号

庁内整理番号

F I

技術表示箇所

H 0 4 B 10/02

H 0 4 B 9/00

M

10/18

D

H 0 4 J 14/08

審査請求 未請求 請求項の数2 O L (全 11 頁)

(21)出願番号

特願平7-85738

(22)出願日

平成7年(1995)4月11日

特許法第30条第1項適用申請有り 1995年2月26日～3月3日、開催の「OPTICAL FIBER COMMUNICATION Postdeadline」において文書をもって発表

(71)出願人 000004226

日本電信電話株式会社

東京都新宿区西新宿三丁目19番2号

(72)発明者 高良 秀彦

東京都千代田区内幸町一丁目1番6号 日

本電信電話株式会社内

(72)発明者 川西 悟基

東京都千代田区内幸町一丁目1番6号 日

本電信電話株式会社内

(72)発明者 盛岡 敏夫

東京都千代田区内幸町一丁目1番6号 日

本電信電話株式会社内

(74)代理人 弁理士 志賀 正武

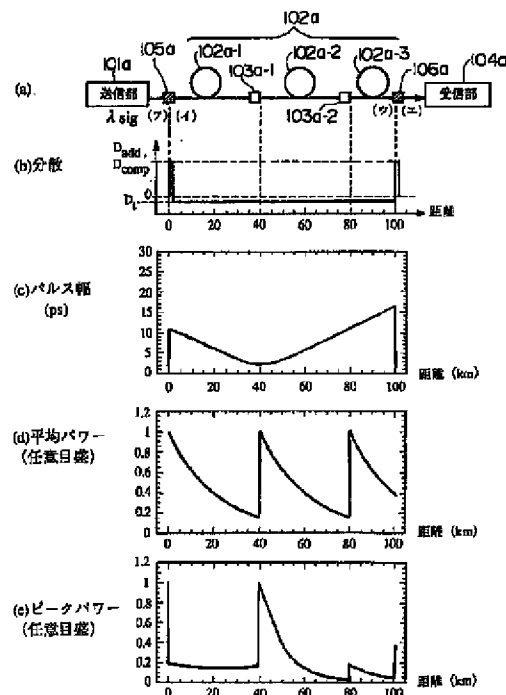
最終頁に続く

(54)【発明の名称】 光パルス伝送方式

(57)【要約】

【目的】 光パルス信号列を光ファイバを用いて伝送する際に、伝送用光ファイバでの非線形光学効果による伝送特性の劣化を少なくする。

【構成】 光パルス信号列を送信部101aから受信部104aへ伝送用光ファイバ102a及び中継器103a-1、103a-2を介して伝送する光パルス伝送方式において、伝送用光ファイバ102a前に光パルスのパルス幅を広げる分散付与手段105aを配置し、伝送用光ファイバ102a後に分散補償手段106aを配置する。分散付与手段105aの全分散量が光パルス信号列のパルス幅を2倍以上に広げる値であり、分散補償手段106aの全分散量が分散付与手段105aと伝送用光ファイバ102aの全分散量の和とほぼ同じ大きさで符号が異なり、分散付与手段105aおよび分散補償手段106aの長さがともに伝送用光ファイバ102aに比べて十分に短いことを特徴とする。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 光パルス信号列を送送用光ファイバを用いて伝送する光パルス伝送方式において、前記伝送用光ファイバ前に分散付与手段を配置し、該伝送用光ファイバ後に分散補償手段を配置し、該分散付与手段の全分散量（＝波長分散(ps/nm/km)と長さ(km)の積）が前記光パルス信号列のパルス幅を2倍以上に広げる値であり、該分散補償手段の全分散量が該分散付与手段と該伝送用光ファイバの全分散量の和とほぼ同じ大きさで符号が異なり、該分散付与手段および該分散補償手段ともに長さが該伝送用光ファイバに比べて十分に短いことを特徴とする光パルス伝送方式。

【請求項2】 光パルス信号列を送送用光ファイバを用いて伝送する光パルス伝送方式において、前記伝送用光ファイバ前に分散付与手段を配置し、該分散付与手段の全分散量（＝波長分散(ps/nm/km)と長さ(km)の積）が前記光パルス信号列のパルス幅を2倍以上に広げられる値であり、該分散付与手段の長さが該伝送用光ファイバに比べて十分に短く、該光パルス信号光の波長を該分散付与手段と該伝送用光ファイバの全分散量の和がほぼ零となる波長とすることを特徴とする光パルス伝送方式。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】本発明は、光パルス列を光ファイバを用いて伝送する光パルス伝送方式に関するものである。

【0002】

【従来の技術】超高速の時分割多重(time-division-multiplexing、以後TDMと称する)光伝送方式は光通信の大容量化を実現する有効な方法であり現在様々な研究開発が進められている(参考文献 S.Kawanishi et al., "100 Gbit/s, 200 km transmission experiment using extremely low jitter PLL timing extraction and a all-optical demultiplexing based on polarization in sensitive four-wave mixing", Electron. Lett. vol. 30, No. 10, 1994, pp. 482-484)。これは現在用いられているTDM光伝送方式(符号化された光パルスを時間軸上に並べて多重して伝送する方式)において、光パルスを短パルス化することで1タイムスロット当りの所用時間を短縮してチャンネル多重数の増加を可能とし、単位時間当りの光パルス数(情報量)を増大する方法である。

【0003】図8(a)は従来のTDM光伝送方式の一例を示したものである。ここで101は送信部、102(102-1、102-2および102-3)は伝送用光ファイバ、103(103-1および103-2)は中継器、104は受信部である。送信部101では光パ

ルス発生、符号化および複数のチャンネルの時間軸上での多重化を行い高速(数Gbit/s～1Tbit/s)の光パルス信号列を生成し、伝送用光ファイバ102および中継器103からなる伝送路に送出する。伝送路の中継器103としては現在主に希土類添加光ファイバ増幅器等で構成される1R中継器が用いられている。この1R中継器は一中継区間での光ファイバでの損失を補償するために設けられている。伝送路を伝播した光パルス信号列は受信部104において各チャンネルに分離され電気信号に変換される。

【0004】図9(a)および(i)はこの伝送系における光パルス信号波形を示したものである。送信部101直後の光パルス信号は図9(a)に示したように強度変調された短光パルスを時間軸上に配置したものである。高速のTDM光伝送系を実現するためには、隣接する光パルス信号との符号間干渉を避けるために幅の狭い光パルスを用いて単位時間当たりのパルス多重数を高くする必要がある。しかし、送信部101で符号間干渉の少ない超短光パルスの信号列を生成しても、伝送光ファイバ102の波長分散が大きい場合には図9(i)のように光パルス広がりが生じ符号間干渉が生じてしまう。したがって、従来の伝送系においては伝送用光ファイバ102の波長分散によるパルス広がりを避けるため、図8(b)に示したように伝送用光ファイバ102の波長分散 D_L を零に一致させていた。これにより、光パルス幅は一定のまま伝播することができ(図8(c)参照)、波長分散の影響による伝送特性の劣化を妨げることができた。

【0005】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、このような伝送系では以下に示す欠点があった。図8(c)のように従来方式では光ファイバ中の光パルス信号列のパルス半値全幅 T_{fwhm} は常に細い状態にある。一方、光パルス信号列の平均パワー P_{ave} は、光ファイバ102-1～102-3の損失と中継器103-1、103-2の利得を繰り返し受けながら伝搬するため図8(d)に示すようになる。このとき光パルス信号列のピークパワー P_{peak} は、一タイムスロット(一データ当りの時間)を T_{slot} とすると次式で近似できる。

【0006】

【数1】

$$P_{peak} \approx P_{ave} \cdot \frac{T_{slot}}{T_{fwhm}} \quad (1)$$

【0007】その結果図8(e)のように、伝送開始地点と各中継器103-1、103-2直後でピークパワーが高くなる領域が生じてしまう。光ファイバ伝送系においては、高パワーの光を伝搬させると光ファイバ内での3次の非線形光学効果で伝送特性の劣化が生じることが知られている。その伝送特性劣化の主な要因として

は、自己位相変調、四光波混合、変調不安定による光パルス信号の光スペクトル広がりや変化があげられる。これらについての参考文献として例えば下記のものがある。

【0008】○自己位相変調、四光波混合、変調不安定；菊池 和朗、「光増幅中継系における増幅器雑音の蓄積—光ファイバの非線形性と分散の影響の解析—」、信学技報、OQE92-116、1992

○自己位相変調；那賀 明 他、「光ファイバ長距離伝送における自己位相変調と群速度分散によるアイ開口劣化」、信学技報、OQE92-117、1992

○四光波混合；青木 恭弘 他、「長距離光増幅中継伝送系における非線形劣化要因の実験的検討」、1992年電子情報通信学会秋期全国大会、B-664、1992

○変調不安定；笠、「コヒーレント光増幅中継システムにおける非線形効果による信号光スペクトル構造変化」、1992年電子情報通信学会秋期全国大会、B-661、1992

【0009】自己位相変調とは、Kerr（カー）効果により光強度に比例して信号光の位相が変化する現象である。これにより光スペクトル広がりが生じ、伝送用光ファイバの波長分散の影響が増大する。四光波混合とは、例えば、光周波数 f_1 、 f_2 、 f_3 の3つの光波が入射した時に新たな光周波数 $f_4 = f_1 + f_2 - f_3$ の光波が発生し、各光波間でパラメトリック相互作用が起きる現象である。信号光が伝送用光ファイバの零分散波長付近にあるとき四光波混合の位相整合条件が満足されるため、信号光と中継器の光増幅器で発生した自然放光との間に相互作用が起き、雑音である自然放光が信号光により増幅される。そして、変調不安定とは、Kerr効果と異常分散に基づいて起きる変調不安定性であり、四光波混合と同様に信号光近傍の雑音が増大する現象である。

【0010】従って、従来の伝送方式では、伝送路中で光パルスは常に短パルスの状態であるためピークパワーが高くなるので、上記の非線形光学効果による伝送特性の劣化が生じやすいという欠点があった。

【0011】また、上記非線形光学効果の中でも、特に自己位相変調は、光パルス伝送方式において大きな制限要因であった。例えば、光パルス信号としてガウシアン形パルスを用いた場合、自己位相変調による光スペクトルの増加量 $\delta\omega$ は次式で近似できる（参考文献：G.P. Agrawal, "Nonlinear Fiber Optics", Academic Press, Chapter 4）。

【0012】

【数2】

$$\delta\omega \approx 1.43 \cdot \frac{\gamma \cdot P_{\text{peak}} \cdot Z}{T_{\text{fwhm}}} \quad (2)$$

【0013】ここで、 γ は非線形定数、 Z は伝搬距離である。（2）式より自己位相変調による光スペクトルの増加量はピークパワーに比例するとともに、パルス幅に逆比例する。つまり、同等のピークパワーにおいても、パルス幅の細いほうが、自己位相変調による光スペクトル広がりが大きくなってしまふ。そのため、短光パルス信号を用いる場合は、自己位相変調による光スペクトル広がりを抑圧するため、ピークパワーを低減する必要があった。従って、従来の伝送方法では、伝送速度の高速化にともない、一パルス当りのエネルギー（ $\equiv P_{\text{peak}} \cdot T_{\text{fwhm}}$ ）が低下するため、信号の信号対雑音比（SN比）が劣化し伝送可能な距離（中継器間隔）が減少するという欠点があった。

【0014】

【発明の目的】上述の課題を解決するため、本発明は、光パルス信号列を光ファイバを用いて伝送する光パルス伝送方式において、伝送用光ファイバでの非線形光学効果による伝送特性の劣化を少なくすることができる光パルス伝送方式を提供することにある。

【0015】

【課題を解決するための手段】請求項1に記載の発明の光パルス伝送方式は、伝送用光ファイバ前に分散付与手段を配置し、伝送用光ファイバ後に分散補償手段を配置する。また、該分散付与手段の全分散量（＝波長分散（ps/nm/km）と長さ（km）の積）が光パルス信号列のパルス幅を2倍以上に広げるのに十分高く、該分散補償手段の全分散量が該分散付与手段と該伝送用光ファイバの全分散量の和とほぼ同じ大きさで符号が異なり、該分散付与手段および該分散補償手段ともに長さが該伝送用光ファイバに比べて十分に短いことを特徴とする。

【0016】請求項2に記載の発明の光パルス伝送方式は、伝送用光ファイバ前に分散付与手段を配置し、該分散付与手段の全分散量（＝波長分散（ps/nm/km）と長さ（km）の積）が光パルス信号列のパルス幅を2倍以上に広げる値であり、該分散付与手段の長さが該伝送用光ファイバに比べて十分に短く、信号光の波長を該分散付与手段と該伝送用光ファイバの全分散量の和がほぼ零となる波長とすることを特徴とする。

【0017】

【作用】請求項1記載の発明では、分散付与手段によって光パルス信号列が分散の影響を受け、各光パルスのパルス幅が広がった状態で、伝送用光ファイバによって伝送される。そして、分散補償手段において、分散付与手段および伝送用光ファイバでの分散が補償され、分散付与手段前の光パルス信号列が復元される。したがって、伝送用光ファイバを伝送させているときのみ光パルス幅を広げることができ、また光パルスのピークパワーを低下させることができるので、伝送用光ファイバにおける非線形光学効果による伝送特性の劣化を少なくすることができる。なお、分散付与手段および分散補償手段の長

さが共に伝送用光ファイバに比べて十分に短いので、分散付与手段および分散補償手段におけるピークパワーの増大による非線形光学効果による伝送特性の劣化は非常に小さい。

【0018】また、請求項2記載の発明では、請求項1記載の発明と同様にして伝送用光ファイバにおける非線形光学効果による伝送特性の劣化を低減する際に、信号光の波長を分散付与手段と伝送用光ファイバの全分散量の和をほぼ零とする波長とすることによって、分散補償手段を省略している。

【0019】

【実施例】

【実施例1】図1(a)は、第1の請求項に記載の光パルス伝送系の第1の実施例の構成図である。ここで101a~104aは図8(a)に示した従来技術と同様にそれぞれ送信部、伝送用光ファイバ、中継器、受信部である。105aは分散付与手段、106aは分散補償手段である。分散付与手段105aおよび分散補償手段106aとしては、図2に示す(a)光ファイバ、(b)半導体レーザ増幅器、(c)プレーナ型光波回路、

(d)反射型ファブリペロー光共振器、(e)ファイバグレイティング等が使用できる。図2において、107は光ファイバ、108は半導体レーザ増幅器、109は励起電流源、110は石英等の基板、111は導波路、112は位相シフト、113は光カップラまたは光サーキュレータ、114は反射率100%未満の光学ミラー、115は反射率100%の光学ミラー、116はファイバにフォトリラクティブ効果等で書き込まれたグレイティングである。これらについて、参考文献を以下に示す。

【0020】○光ファイバ; A.M. Vengsarkar et al., "Fundamental mode dispersion-compensating fibers: design considerations and experiments", OFC'94, Thk2, 1994

○プレーナ型光波回路; K.Takiguti et al., "Planar lightwave circuit optical dispersion equalizer", ECOC'93, ThC12.9, 1993

○GT干渉計; 深代 他; 「光共振器を用いた分散補償方式の検討」、1994年電子情報通信学会秋期大会講演論文集、B-935, 1994

○ファイバグレイティング; K.O. Hill et al., "Aperiodic in-fiber Bragg gratings for optical fiber dispersion compensation", OFC'94 PD2, 1994

【0021】以下、本実施例の原理について説明する。図1(a)に示したように、伝送用光ファイバ102a-1、102a-2および102a-3ならびに中継器103a-1および103a-2からなる伝送路の前に分散付与手段105a、伝送路後に分散補償手段106aをそれぞれ配置する。この分散付与手段105aの全分散量(=波長分散(ps/nm/km)×長さ(km))は光パルス

信号のパルス幅を2倍以上に広げるのに十分高く、分散補償手段106aの全分散量は分散付与手段105aと伝送路の全分散量の和と同じ大きさで符号が異なる。また分散付与手段105aおよび分散補償手段106aの長さ L_{add} および L_{comp} は伝送用光ファイバ102aの全長 L_t に比べて十分に短い。

【0022】本実施例における波長分散の分布を図1(b)に示す。伝送用光ファイバ102a内での四光波混合、変調不安定の影響を低減するために伝送用光ファイバ102aの波長分散 D_t を正常分散に設定している。また本実施例は、分散付与手段105aの波長分散 D_{add} が異常分散で、分散付与手段105aと伝送用光ファイバ102aとの全分散量の和が負($D_{add} \cdot L_{add} + D_t \cdot L_t < 0$)の場合である。従って、分散補償手段106aの波長分散 $D_{comp} \cdot L_{comp}$ ($= -D_{add} \cdot L_{add} - D_t \cdot L_t > 0$)は異常分散である。

【0023】図1(c)および図9(A)~(E)は本実施例におけるパルス幅の変化を示している。光パルス信号列のパルス幅は送信部101a直後では細いが(図9(A)参照)、分散付与手段105aを伝搬することによりパルス幅が広がる(図9(I)参照)。伝送路を伝送した光パルス信号列は伝送路の波長分散の影響をさらに受ける。本実施例の場合、分散付与手段105aと伝送用光ファイバ102aの波長分散の符号が異なるためパルス幅は徐々に細くなる。そして分散付与手段105aと伝送用光ファイバ102aの全分散量の和が零となる距離(この場合は約40km)で一度パルス幅が最初の値に戻り、その後また広がる(図9(U)参照)。分散補償手段106aの全分散量は分散付与手段105aと伝送路の全分散量の和とほぼ同じ大きさで符号が異なるため、分散補償手段106a直後では、光パルス信号列の受ける全分散量の和はほぼ零となり、送信部101a直後のパルス幅に復元する(図9(E)参照)。

【0024】このとき光パルス幅の平均パワーの変化は図8(d)に示す従来方式と同様である(図1(d)参照)。従って、光パルス列のピークパワー P_{peak} の変化の振る舞いは(1)式で求めると図1(e)のようになる。本実施例ではピークパワーの高い領域は分散付与手段105aと分散補償手段106aの非常に短い領域と伝送路中の一部のみである。この図と従来方式のピークパワーを示す図8(e)を見比べると、本実施例の方がピークパワーの高い領域が減少していることが分かる。すなわち本発明により、伝送路中での光パルス信号列のパルス幅を広げて、ピークパワーの高い領域を従来方式より削減することが可能であり、その結果非線形光学効果による伝送特性の劣化を低減することができる。

【0025】具体的には例えば、中心波長(λ_{sig})1556nm、パルス幅2psの光パルス信号を用いて、伝送用光ファイバ(102a-1、102a-2および102a-3)として長さ(L_t)100km(40k

m+40km+20km)、零分散波長(λ_0)1558nm、波長分散 $D_t = -0.16$ ps/nm/kmの分散シフト光ファイバ(以下DSFと称する)を用いる光パルス伝送系において、分散付与手段105aとして長さ(L_{add})400mで零分散波長(λ_0)1300nm、波長分散 $D_{add} = 16$ ps/nm/kmの1.3 μ m零分散光ファイバ(以下1.3 λ 0ファイバと称する)を用いた場合、分散付与手段105aの全分散量は $D_{add} \cdot L_{add} = 6.4$ ps/nmとなり、伝送用光ファイバ102aの全分散量は $D_t \cdot L_t = -16$ ps/nmとなる。分散補償手段106aとして分散付与手段105aと同様に波長分散 $D_{comp} = 16$ ps/nm/kmの1.3 λ 0ファイバを用いた場合、必要な長さ L_{comp} は次式で計算できる。

【0026】

$$T_{fwhm2} = T_{fwhm1} \left[\left\{ 1 - C \cdot \frac{\lambda_{sig}^2 \cdot D}{2\pi c} \left(\frac{1.665}{T_{fwhm1}} \right)^2 \cdot Z \right\}^2 + \left\{ \frac{\lambda_{sig}^2 \cdot D}{2\pi c} \left(\frac{1.665}{T_{fwhm1}} \right)^2 \cdot Z \right\}^2 \right] \\ C = \left[\left(\frac{T_{fwhm1}}{T_{fwhm0}} \right)^2 - 1 \right]^{1/2} \quad (4)$$

【0029】ここで、Cはパルスのチャージングの大きさを示すチャージングパラメータ、cは光速、Dは波長分散、Zは伝搬距離、 T_{fwhm0} はチャージングが無い状態でのパルス幅である。(4)式において送信部101a直後の光パルス信号がチャージングの無い光パルスでパルス幅 $T_{fwhm0} = 2$ psであるとする、分散付与手段105a後、伝送後および分散補償手段106a後のパルス幅はそれぞれ11ps、16psおよび2psと計算される。これより上記設定の場合、分散付与手段105aにより光パルス信号列のパルス幅を約5倍に広げてピークパワーを1/5程度に低減してから伝送することにより、同じ平均パワーを保持した上で、従来の方式に比べて、非線形光学効果による伝送特性の劣化を大幅に低減することができる。

【0030】さらに、本発明を用いることによって、伝送路中の平均パワーを増加させることが可能であるため、伝送速度の高速化と中継器間隔の増大を同時に実現することが可能である。

【0031】なお、本実施例では、中継器103a-1および103a-2の数が2である場合について説明したが、中継器数がそれ以外の場合についても当然ながら本発明は適用できる。また、本発明は、伝送用光ファイバ102aとして分散シフト光ファイバ(DSF)以外に1.3 μ m零分散光ファイバを用いた伝送系においても適用可能である。このとき、分散付与手段105aおよび分散補償手段106aの波長分散を正常分散に設定

【数3】

$$L_{comp} = - \frac{D_{add} \cdot L_{add} + D_t \cdot L_t}{D_{comp}} \quad (3)$$

【0027】従って、この場合分散補償手段106aとして600mの長さの1.3 λ 0ファイバを用いれば、光パルス信号を列受信部104a直前で送信部101a直後と同じ短光パルス信号列に復元することができる。一方、分散媒質伝搬前後の光パルス幅 T_{fwhm1} 、 T_{fwhm2} の関係は論理的に次式で与えられる(参考文献:G.P. Agrawal, "Nonlinear Fiber Optics", Academic Press, Chapter 3)。

【0028】

【数4】

する場合は、分散付与手段105aおよび分散補償手段106aとして例えば分散シフト光ファイバが使用できる。逆に分散付与手段105aおよび分散補償手段106aの波長分散を異常分散に設定する場合は、例えば短波長用光ファイバ(零分散波長<1.3 μ m)が使用できる。

【0032】[実施例2]図3(a)は、請求項1に記載の光パルス伝送系の第2の実施例の構成図であり、この図に示す各構成には、図1(a)に示す対応する各構成と同一の符号を付けている。ただし、図3では添字として英字aに代えた英字bを用いている。

【0033】本実施例は、分散付与手段105bと分散補償手段106bがともに正常分散を有して、伝送用光ファイバ102b(102b-1~102b-3)が異常分散を有している場合である(図3(b)参照)。これは分散付与手段105b、分散補償手段106bおよび伝送用光ファイバ102bの波長分散の符号が実施例1と逆であるが、パルス広がり振る舞いは実施例1と同様になる(図3(c)参照)。従ってピークパワーの振る舞いも実施例1と同様に、伝送用光ファイバ102b中で一度高くなり、また減少する。従って本実施例においても伝送路中でのパルス幅を広げてピークパワーの高い領域を低減することができ(図3(e)参照)、従来の方式より非線形光学効果による伝送特性の劣化を抑圧することができる。

【0034】具体的には例えば、波長分散 $D_t = 0.1$

6ps/nm/kmのDSFを用いる光パルス伝送系において、分散付与手段105bとして長さ $L_{add}=0.2$ kmで波長分散 $D_{add}=-40$ ps/nm/kmの長波長零分散光ファイバを用いた場合、分散付与手段105bの全分散量は $D_{add} \cdot L_{add}=-8$ ps/nmとなり、伝送用光ファイバ102bの全分散量は $D_t \cdot L_t=16$ ps/nmとなる。分散補償手段106bとして波長分散 $D_{comp}=-40$ ps/nm/kmの長波長零分散光ファイバを用いた場合、必要な長さ L_{comp} は(3)式より、 $L_{comp}=0.2$ kmとなる。従って、この場合、分散補償手段106bとして0.2kmの長さの長波長零分散光ファイバを用いれば、受信部104b直前で送信部101b直後と同じ超短パルス信号列に復元することができる。なお、本実施例の場合、光パルス信号列の送信平均パワーを伝送用光ファイバ102b中で変調不安定が生じない程度に設定する必要がある。

【0035】[実施例3] 図4(a)は請求項1に記載の光パルス伝送系の第3の実施例の構成図であり、図1(a)に示すものに対応する各構成には、添字をcに代えた同一の符号を付けている。本実施例は、分散付与手段105cの波長分散を異常分散、伝送用光ファイバ102cの波長分散を正常分散とし、かつ分散付与手段105と伝送用光ファイバ102cの全分散量の和が正($D_t \cdot L_t + D_{add} \cdot L_{add} > 0$)とした場合である。従って、分散補償手段106cの波長分散は正常分散($= -D_t \cdot L_t - D_{add} \cdot L_{add} < 0$)である(図4(b)参照)。ただし、それ以外は第1の実施例と同様である。

【0036】図4(c)は本実施例におけるパルス幅の変化を示している。光パルス信号列のパルス幅は送信部101c直後では細いが、分散付与手段105cを伝搬することによりパルス幅が広がる。伝送路中では、分散付与手段105cと伝送用光ファイバ102cの波長分散の符号が異なるためパルス幅は徐々に細くなる。本実施例の場合、伝送路中で分散付与手段105cと伝送用光ファイバ102cの全分散量の和が零とならないためパルス幅は伝送路中で常に広がっている。分散補償手段106cの全分散量は分散付与手段105cと伝送路の全分散量の和とはほぼ同じ大きさで符号が異なるため、分散補償手段106c直後では光パルス信号列の受ける全分散量はほぼ零となり、送信部101c直後のパルス幅に復元する。

【0037】本実施例においても光パルス幅の平均パワーの変化は従来方式と同じである(図4(d)参照)。光パルス列のピークパワーの変化の振る舞いを(1)式で求めると図4(e)ようになる。図より明らかなように本実施例により伝送路中でのピークパワーを常に低いレベルに維持することができる。分散付与手段105cと分散補償手段106cの領域ではピークパワーが高くなるが伝搬距離が十分短いので非線形光学効果は無視しえる。従って、本実施例は第1、第2の実施例よりさ

らに非線形光学効果による伝送特性の劣化を抑圧することができる。

【0038】具体的には例えば、波長分散 $D_t=-0.08$ ps/nm/kmのDSFを用いる光パルス伝送系において、分散付与手段105cとして長さ $L_{add}=1$ kmで波長分散 $D_{add}=16$ ps/nm/kmの1.3μmファイバを用いた場合、分散付与手段105cの全分散量は $D_{add} \cdot L_{add}=16$ ps/nmとなり、伝送用光ファイバ102cの全分散量は $D_t \cdot L_t=-8$ ps/nmとなる。分散補償手段106cとして波長分散 $D_{comp}=-40$ ps/nm/kmの長波長零分散光ファイバを用いた場合、必要な長さ L_{comp} は(3)式より $L_{comp}=0.2$ kmとなる。従って、この場合、分散補償手段106cとして0.2kmの長さの長波長零分散光ファイバを用いれば、受信部104c直前で送信部101c直後と同じ超短パルス信号列に復元することができる。

【0039】(4)式により分散付与手段105c後、伝送後および分散補償手段106c後のパルス幅を求めると、それぞれ27ps、14psおよび2psとなる(図4(c)参照)。これより上記設定の場合、分散付与手段105cにより伝送路中の光パルス信号列のパルス幅を約7~13倍に広げ、ピークパワーを常に1/7以下に低減することができる。従って、第1、第2の実施例より非線形光学効果による伝送特性の劣化を著しく低減することができる。

【0040】[実施例4] 図5(a)は、請求項1に記載の光パルス伝送系の第4の実施例の構成図であり、図1(a)に示すものに対応する各構成には、添字をdに代えた同一の符号を付けている。本実施例は、分散付与手段105dおよび伝送用光ファイバ102dが正常分散を有し、分散補償手段106dが異常分散を有している場合である(図5(b)参照)。

【0041】図5(c)は本実施例におけるパルス幅の変化を示している。本実施例の場合、伝送路中では、分散付与手段105dと伝送用光ファイバ102dの波長分散の符号が等しいためパルス幅は単調増加する。分散補償手段106dの全分散量は分散付与手段105dと伝送路の全分散量とはほぼ同じ大きさで符号が異なるため、分散補償手段106d直後では光パルス信号列の受ける全分散量はほぼ零となり、送信部101d直後のパルス幅に復元する。

【0042】本実施例においても伝送路中の光パルス列のパルス幅を常に広げてピークパワーを常に低いレベルに維持することができる(図5(c)、(e)参照)。従って、本実施例は第3の実施例と同様に第1、第2の実施例よりさらに非線形光学効果による伝送特性の劣化を抑圧することができる。本実施例は第3の実施例の分散付与手段105cと分散補償手段106cの分散符号を入れ替えて、分散付与手段105dと分散補償手段106dを構成したものである。従って具体例として、第

3の実施例の分散付与手段105cと分散補償手段106cの分散の符号を入れ替えたものを用いれば、受信部104d直前で送信部101d直後と同じ超短パルス信号列に復元することができ、ピークパワーも同様に常に1/7以下に低減することができる。従って、第1、第2の実施例より非線形光学効果による伝送特性の劣化を低減することができる。

【0043】[実施例5] 図6(a)は、請求項2に記載の光パルス伝送系の第1の実施例の構成図であり、図1(a)に示すものに対応する各構成には、添字をeに代えた同一の符号を付けている。本実施例は、分散付与手段105eのみを伝送用光ファイバ102e（この場合、102e-1）前に配置しており、この分散付与手段105eは、その全分散量が光パルス信号のパルス幅を2倍以上に広げるのに十分高く、その長さ L_{add} が伝送用光ファイバ102eの全長 L_t に比べて十分に短い。また、光パルス信号列の波長 λ_{sig} を、分散付与手段105eと伝送用光ファイバ102eとの全分散量の和がほぼ零となるように設定する。

【0044】本実施例における波長分散の分布を図6(b)に示す。伝送用光ファイバ102e内での四光波混合、変調不安定の影響を低減するために伝送用光ファイバ102eの波長分散 D_t を正常分散に設定している。従って、分散付与手段105eの波長分散 D_{add} は異常分散（ $D_{add} \cdot L_{add} + D_t \cdot L_t = 0$ ）となる。

【0045】図6(c)は本実施例におけるパルス幅の変化を示している。分散付与手段105eを伝搬して広がったパルス幅は、さらに、伝送路の波長分散の影響を受ける。本実施例の場合、分散付与手段105eと伝送用光ファイバ102eの波長分散の符号が異なるためパルス幅は徐々に細くなる。そして伝送用光ファイバ102e（この場合、102e-3）直後で光パルス信号列の受ける全分散量の和はほぼ零となり、送信部101e直後のパルス幅に復元する。

【0046】従って、光パルス列のピークパワー P_{peak} の変化の振る舞いは図6(e)のようになる。本実施例ではピークパワーの高い領域は分散付与手段105eの非常に短い領域と伝送路の最後の一部のみである。すなわち本発明においても、伝送路中での光パルス信号列のパルス幅を広げてピークパワーの高い領域を従来方式より削減することが可能であり、その結果、非線形光学効果による伝送特性の劣化を低減することができる。

【0047】具体的には例えば、波長分散 $D_t = -0.16 \text{ ps/nm/km}$ のDSFを用いる光パルス伝送系において、分散付与手段105eとして長さ (L_{add}) 1kmで零分散波長 (λ_0) 1300nm、波長分散 $D_{add} = 1.6 \text{ ps/nm/km}$ の1.3 λ_0 ファイバを用いた場合、分散付与手段105eの全分散量は $D_{add} \cdot L_{add} = 1.6 \text{ ps/nm}$ となり、伝送用光ファイバ102eの全分散量は $D_t \cdot L_t = -1.6 \text{ ps/nm}$ となる。従って、この場合、分散付与

手段105eと伝送用光ファイバ102eの全分散量は零となり、受信部104e直前で送信部101e直後と同じ短光パルス信号列に復元することができる。

【0048】(4)式において送信部101e直後の光パルス信号がチャープの無い光パルスでパルス幅 $T_{fwhm} = 2 \text{ ps}$ であるとする、分散付与手段105e後および伝送後のパルス幅はそれぞれ27psおよび2psと計算される。これより上記設定の場合、分散付与手段105eにより光パルス信号列のパルス幅を約13倍に広げてピークパワーを1/13程度に低減してから伝送することにより、非線形光学効果による伝送特性の劣化を大幅に低減することができる。従って、本実施例を用いることにより、伝送路中の平均パワーの増加が可能であるため、伝送速度の高速化と中継器間隔の増大を同時に実現することが可能である。本実施例では、中継器数2の場合について説明したが、中継器数がそれ以外の場合についても本発明を適用することができる。また伝送用光ファイバ102eとして分散シフト光ファイバ以外に1.3 μm 零分散光ファイバを用いた伝送系においても適用可能である。

【0049】[実施例6] 図7(a)は、請求項2に記載の光パルス伝送系の第2の実施例の構成図であり、図6(a)に示すものに対応する各構成には、添字をfに代えた同一の符号を付けている。本実施例は、実施例5において、分散付与手段105eが正常分散であり伝送用光ファイバ102eが異常分散である場合である（図6(b)および図7(b)参照）。つまり、本実施例は、分散付与手段105fおよび伝送用光ファイバ102fの波長分散の符号が実施例5と逆の場合であるが、パルス広がり振る舞いは実施例5と同様になる（図7(c)参照）。従ってピークパワーの振る舞いも実施例5と同様に、伝送用光ファイバ102f中で低い状態から徐々に高くなる（図7(e)参照）。従って本実施例においてもパルス幅を広げてピークパワーの高い領域を低減することができ、従来の方式より非線形光学効果による伝送特性の劣化を抑圧することができる。

【0050】具体的には例えば、伝送用光ファイバ102fとして波長分散 $D_t = 0.16 \text{ ps/nm/km}$ のDSFを用いる光パルス伝送系において、分散付与手段105fとして長さ $L_{add} = 0.4 \text{ km}$ で波長分散 $D_{add} = -4.0 \text{ ps/nm/km}$ の長波長零分散光ファイバを用いた場合、分散付与手段105fの全分散量は $D_{add} \cdot L_{add} = -1.6 \text{ ps/nm}$ となり、伝送用光ファイバ102fの全分散量は $D_t \cdot L_t = 1.6 \text{ ps/nm}$ となる。従って、分散付与手段105fと伝送用光ファイバ102fの全分散量の和は零となり、受信部104f直前で送信部101f直後と同じパルス幅の光パルス信号列に復元することができる。ただし本実施例の場合、光パルス信号列の送信平均パワーを伝送用光ファイバ102f中で変調不安定が生じない程度に設定する必要がある。

【0051】

【発明の効果】以上説明したように、請求項1記載の発明は、光パルス信号列を光ファイバを用いて伝送する光パルス伝送系において、光パルス信号のパルス幅を広げるのに十分高い全分散量を有する分散付与手段を伝送用光ファイバの前に配置し、該分散付与手段と伝送用光ファイバの全分散量の和と同じ大きさで符号が異なる全分散量を有する分散補償手段を伝送用光ファイバの後ろに配置することで、伝送用光ファイバでの分散および非線形光学効果による伝送特性の劣化の著しく少ない光パルス伝送系を提供することができる。

【0052】また、請求項2記載の発明によれば、伝送用光ファイバ前に、全分散量がパルス信号列のパルス幅を十分広げられる値であり、かつ長さが伝送用光ファイバに比べて十分に短い分散付与手段を配置し、光パルス信号光の波長を分散付与手段と伝送用光ファイバの全分散量の和がほぼ零となる波長とするので、平均パワーを低下させることなく光パルス列のピークパワーを下げることで、伝送用光ファイバでの分散および非線形光学効果による伝送特性の劣化の著しく少ない光パルス伝送系を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】請求項1に記載の光パルス伝送系の第1の実施例を示す図である。

【図2】分散付与手段および分散補償手段の構成例を示す構成図である。

【図3】請求項1に記載の光パルス伝送系の第2の実施例を示す図である。

【図4】請求項1に記載の光パルス伝送系の第3の実施

例を示す図である。

【図5】請求項1に記載の光パルス伝送系の第4の実施例を示す図である。

【図6】請求項2に記載の光パルス伝送系の第1の実施例を示す図である。

【図7】請求項2に記載の光パルス伝送系の第2の実施例を示す図である。

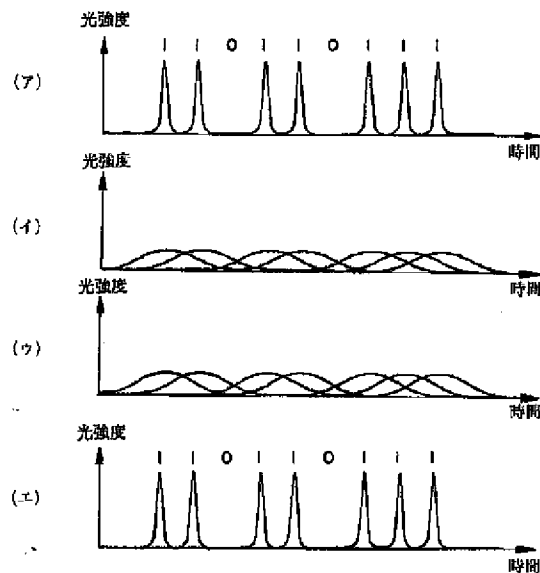
【図8】光パルス伝送方式の従来例を示す図である。

【図9】光パルス信号列の波形の変化を示す図である。

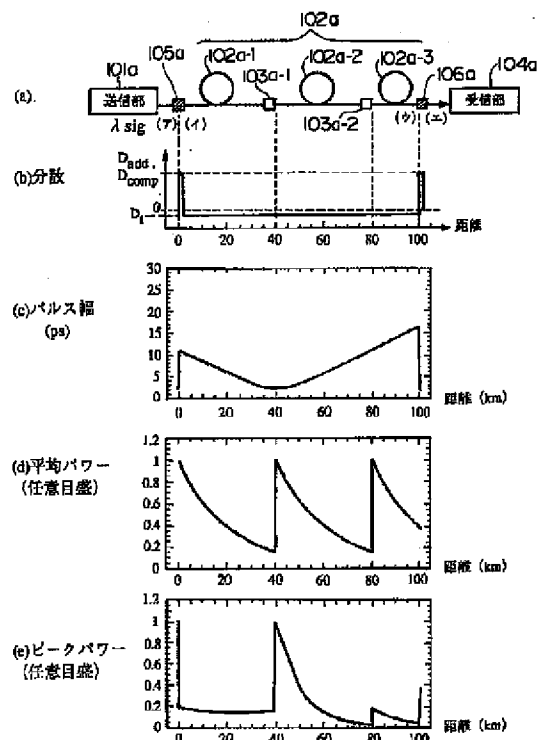
【符号の説明】

- 101a～101f 送信部
- 102a～102f 伝送用光ファイバ
- 103a-1～103f-1、103a-2～103f-2 中継器
- 104a～104f 受信部
- 105a～105f 分散付与手段
- 106a～106d 分散補償手段
- 107 光ファイバ
- 108 半導体レーザ増幅器
- 109 励起電流源
- 110 石英等の基板
- 111 導波路
- 112 位相シフタ
- 113 光カップラまたは光サーキュレータ
- 114 反射率100%未満の光学ミラー
- 115 反射率100%の光学ミラー
- 116 ファイバにフォトリラクティブ効果等で書き込まれたグレーティング

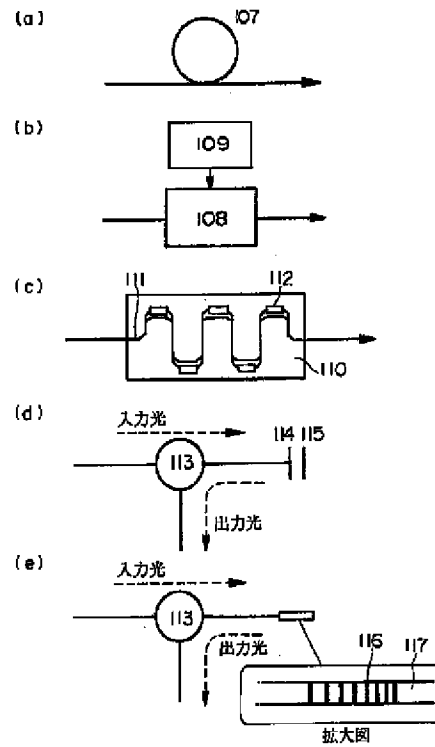
【図9】



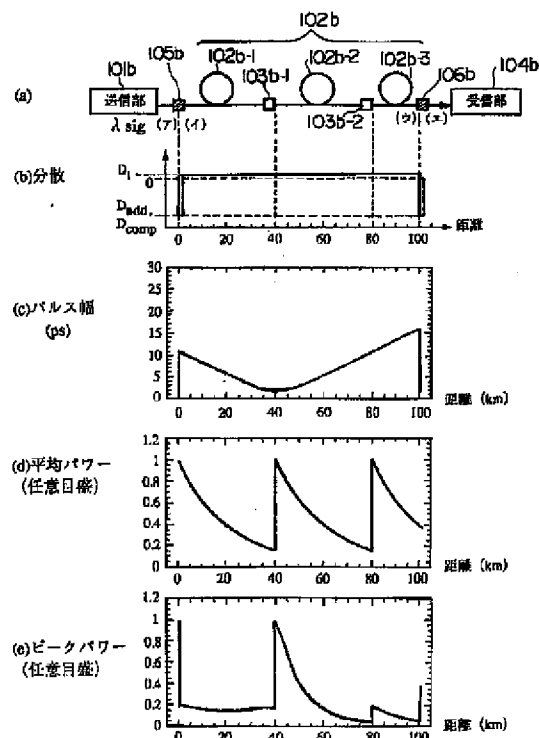
【図1】



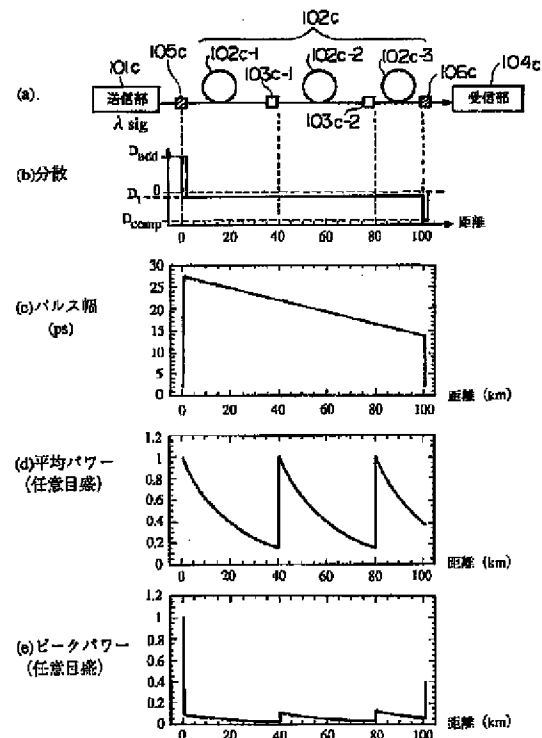
【図2】



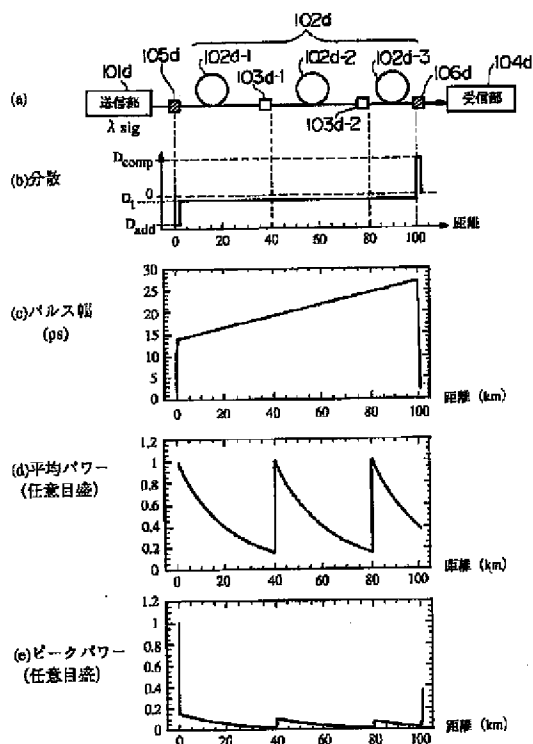
【図3】



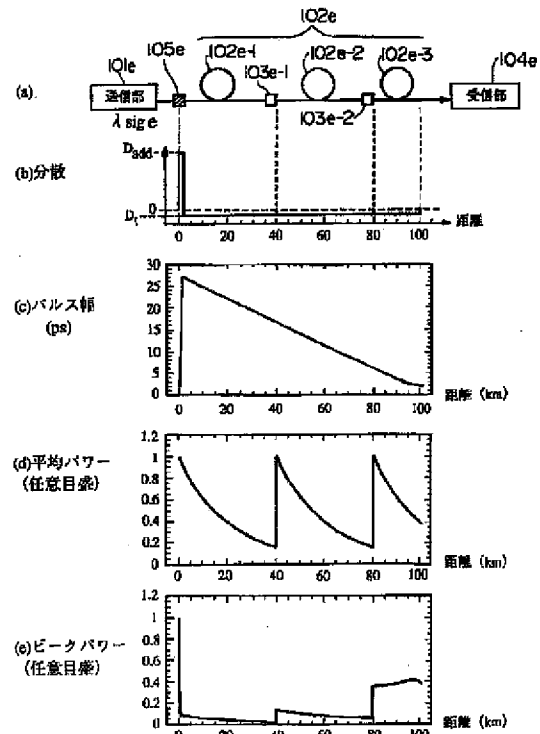
【図4】



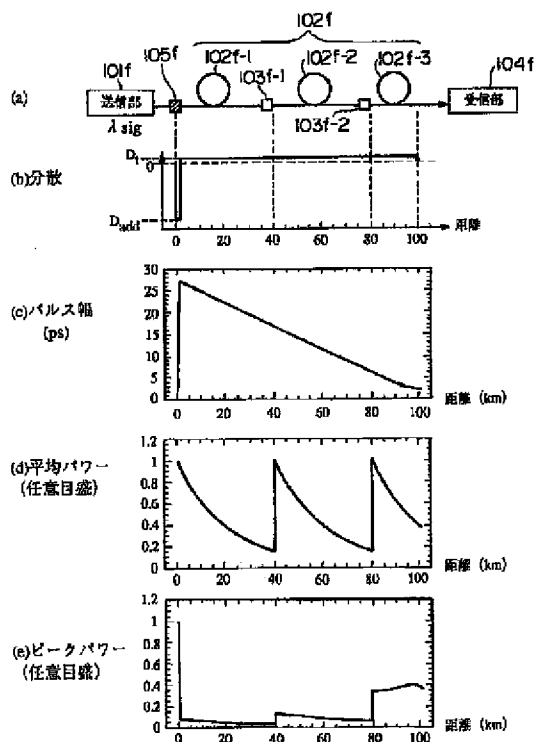
【図5】



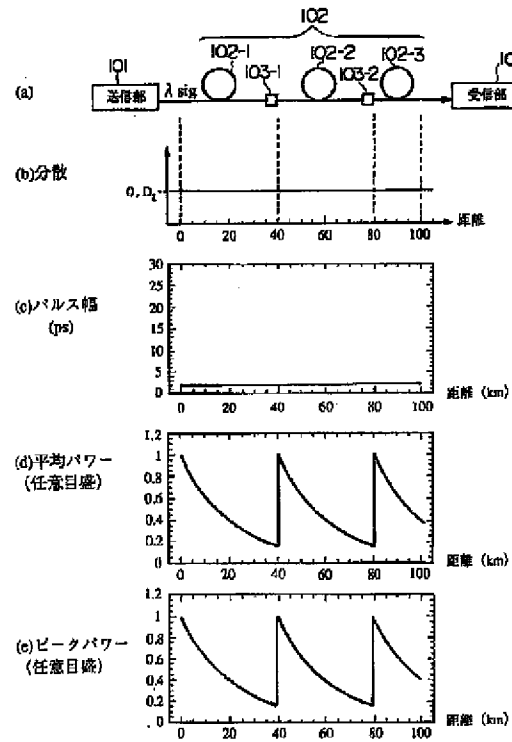
【図6】



【図7】



【図8】



フロントページの続き

(72)発明者 鎌谷 修

東京都千代田区内幸町一丁目1番6号 日
本電信電話株式会社内

(72)発明者 猿渡 正俊

東京都千代田区内幸町一丁目1番6号 日
本電信電話株式会社内